中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 716−724

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151309

秸秆还田、一膜两年用及间作对农田碳排放的短期效应*

殷 文† 史倩倩† 郭 瑶 冯福学 赵 财 于爱忠 柴 强**

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070)

摘 要 针对作物高产模式碳排放高、生产实践中缺乏减排理论和技术问题，通过田间试验，探讨了不同秸秆还田方式、地膜一膜两年用及间作对小麦、玉米农田碳排放特征的影响，以期为碳减排种植模式及配套技术的构建提供理论与实践依据。结果表明，间作具有显著的碳减排作用，与传统单作小麦、玉米相比，小麦||玉米间作全生育期平均碳排放总量减少 279~876 kg·hm^{-2}，减幅达 5.1%~16.0%，达到显著性差异。免耕秸秆还田及免耕一膜两年用可降低次年农田土壤的碳排放，免耕秸秆还田单作小麦较传统翻耕处理 CO_2 排放显著减少 648~966 kg·hm^{-2}，减幅 21.3%~31.8%；免耕一膜两年用单作玉米较翻耕覆新膜传统处理碳减排 632 kg·hm^{-2}，减幅 10.0%，差异显著。小麦秸秆还田及地膜两年用集成应用于小麦间作玉米进一步提高了间作的碳减排效应，与传统间作处理(CTI_1)相比，间作小麦高留茬免耕结合一膜两年用处理($NTSSI_2$)和小麦秸秆还田覆盖结合一膜两年用处理($NTSI_2$)的碳排放总量分别降低 471 kg·hm^{-2} 与 518 kg·hm^{-2}，降幅分别为 9.2%与 10.1%，达到显著水平；$NTSSI_2$ 和 $NTSI_2$ 的总固碳量/土壤呼吸释放总碳量(NPP_C/Ras)值分别为 13.7 与 14.0，较 CTI_1 分别高 19.1%与 21.7%，即 $NTSI_2$ 减排、碳汇潜力更为突出。因此，小麦高茬 25~30 cm 秸秆覆盖免耕结合一膜两年用间作($NTSI_2$)可作为干旱绿洲灌区碳减排、碳增汇高效农作制模式。

关键词 秸秆还田 地膜两年用 小麦||玉米间作 碳排放 碳平衡
中图分类号: S341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0716-09

Short-term response of farmland carbon emission to straw return, two-year plastic film mulching and intercropping*

YIN Wen†, SHI Qianqian†, GUO Yao, FENG Fuxue, ZHAO Cai, YU Aizhong, CHAI Qiang**

(Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract In conventional crop production, high yield has always meant high carbon emissions. It has therefore become urgent to develop theoretical and practical strategies for high yield with low carbon emissions in modern agriculture. In this study, a field experiment was conducted in a typical oasis irrigation region to determine the integrated response of carbon emission in wheat-maize intercropping systems under different straw-return (straw standing, straw mulching and no-mulching), plastic film mulching (mulching for one year and two years), cropping (wheat-maize intercropping, monoculture of wheat and maize) and tillage (no-tillage, conventional tillage) patterns. The results showed that intercropping significantly decreased soil carbon emissions in farmlands. Compared with monoculture wheat and maize under conventional tillage management, the averaged total soil CO_2 emissions in wheat-maize intercropping systems reduced by a range of 279–876 kg·hm^{-2}, the equivalent of 5.1%–16.0%. No tillage with straw-return and plastic film mulching for 2-year reduced soil carbon emissions in the next year. No-tillage in combination with straw-return to soil decreased total soil CO_2 emissions by 648–966 kg·hm^{-2}, the

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B10)、甘肃农业大学自列项目(GUAU-ZL-2015-001)和“甘肃农业大学伏羲优秀人才”项目资助
** 通讯作者：柴强，主要从事多熟种植、循环农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
† 同等贡献者：殷文，主要从事节水农业研究，E-mail: yinwentx@126.com；史倩倩，主要从事多熟种植研究，E-mail: shiqq1990@126.com
收稿日期：2015−12−01 接受日期：2016−02−02

* This study financially supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B10), the Project of Gansu Agricultural University (No. GUAU-ZL-2015-001), and the Outstanding Talent Culture Project of Gansu Agriculture University.
** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
Received Dec. 1, 2015; accepted Feb. 2, 2016

equivalent of 21.3%–31.8%, than conventional tillage without straw-return to soil in mono-cropped wheat field. Plastic film mulching for two years reduced total soil CO_2 emissions by 632 kg·hm^{-2} compared with that of conventional tillage in mono-cropped maize. In particular, wheat-maize intercropping in combination with straw-return to soil and 2-year plastic film mulching further reduced the carbon emissions. Compared with conventional intercropping with plastic film mulching for 1-year and conventional tillage (CTI_1), wheat-maize intercropping with 25–30 cm of standing straw, 2-year plastic film mulching and no-tillage ($NTSSI_2$) and wheat-maize intercropping with 25–30 cm straw mulching on the soil and 2-year plastic film mulching and no-tillage ($NTSI_2$) reduced total soil CO_2 emissions by 471 kg·hm^{-2} and 518 kg·hm^{-2}, the equivalent of 9.2% and 10.1%, respectively. The carbon sequestration potential (ratio of total plant carbon fixation to total soil carbon emission, i.e., NPP_C/Ras) were 13.7 and 14.0, respectively, in $NTSSI_2$ and $NTSI_2$ treatments, they were higher by 19.1% and 21.5% than that of CTI_1, respectively. This indicated that $NTSI_2$ had a more prominent potential for reducing carbon emissions and enhancing carbon sequestration. Thus, $NTSI_2$ was recommended as the best farming pattern due to its high-efficiency of carbon emission reduction and carbon sequestration in irrigated arid oasis regions.

Keywords　Straw-return to soil; Two-year plastic film mulching; Wheat-maize intercropping; Carbon emission; Carbon budget

土壤生态系统为植物生长发育提供养分和水分的同时大量排放 CO_2[1]，相关资料显示，大气中每年约有 5%~20%的 CO_2 直接来源于土壤[2]，而农田则为主要排放源[3]，采取有效种植模式及耕作措施减少农田 CO_2 排放是农业可持续发展的重要研究课题。生产实践证明，间作为资源需求特性不同的作物提供了从时间和空间立体利用生态位的基础[4]，促成了种间互补对相关资源的高效利用[5]，从而为提高产量[6]和有效减少农田土壤碳排放奠定了基础[7−8]。小麦间作玉米是我国典型的高产多熟种植模式，为保证我国粮食安全做出了重要贡献[9]，但其规模化应用面临高产与减排如何协调的挑战。相关研究表明，保护性耕作作为一种实现农业可持续发展的重要耕作措施[10]，可显著减少农田土壤碳排放[8,11]、增加农田 CO_2 截存和固持[12]，但该技术应用于间作中的研究鲜见报道，使得间作与保护性耕作集成应用增产、减排的优势未能发挥出来。另一方面，随干旱胁迫和粮食需求压力的增大，地膜覆盖作为保水、增温、高产的栽培技术，得到了规模化推广应用[13−14]，但地膜覆盖增大碳投入和能源消耗并产生碳排[15]的事实，使得地膜减量化作物生产技术研发亟待深入。纵观低投、碳减排作物生产理论和技术研究进展发现，将间作、保护性耕作和地膜减量化技术集成于同一模式的研究少见报道，使得生产实践中缺乏构建基于间作高产和低投减排型农作制模式的理论依据。为此，本研究以小麦间作玉米为基础，集成秸秆还田、地膜两年用和免耕技术，探讨复合农艺措施对农田碳排放特征的影响，以期为绿洲灌区建立高产、低排放农作制模式提供实践与理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本研究在甘肃农业大学绿洲农业科研教学基地(103°5′E, 37°30′N)进行。试验区位于河西走廊东端，属寒温带干旱气候区，海拔 1 506 m，无霜期约 155 d，多年平均降雨量约 156 mm、年蒸发量约 2 400 mm，年平均气温 7.2 ℃，≥10 ℃积温 2 985.4 ℃；日照时数 2 945 h; 0~30 cm 土壤全氮 0.68 g·kg^{-1}、全磷 1.41 g·kg^{-1}、有机质 14.31 g·kg^{-1}，适于发展间作套种。小麦间作玉米是该区主要的间作模式，传统栽培中秸秆不还田、每年翻耕、玉米带覆盖地膜。2014 年度试验期内，小麦播种到收获期降水量为 100.9 mm，玉米播种到收获期降水量为 241.7 mm。

1.2　试验设计

2013 年布置预备试验，2014 年进行正式试验。试验采用 3 因素随机区组设计, 3 因素分别为种植模式(单作小麦、单作玉米、小麦间作玉米)、小麦秸秆处理方式(25~30 cm 高茬收割免耕、25~30 cm 高等量秸秆覆盖免耕、低茬收割翻耕)和地膜覆膜方式(传统耕作地膜一年用、免耕地膜两年用)，共组成 8 个处理，每处理 3 次重复，处理代码及不同处理的操作规范见表 1。

小麦(*Triticum aestivum*)品种为‘宁春 4 号’，玉米(*Zea mayz*)品种为‘先玉 335’。小麦 3 月 21 日播种, 7 月 24 日收获；玉米 4 月 25 日播种，10 月 1 日收获。单作小麦密度 675.0 万株·hm^{-2}，单作玉米密度 8.25 万株·hm^{-2}，玉米覆膜。间作带宽 160 cm，两种作物各占 80 cm；小麦每带种 6 行，行距 12 cm，播种密度 375.0 万株·hm^{-2}；玉米种 2 行，行距 40 cm，株距 24 cm，播前覆膜，播种密度 5.25 万株·hm^{-2}，每个小区种 3 个自然带，小区面积 48 m^2。

单作小麦施纯氮 225 kg·hm^{-2}和 P_2O_5 150 kg·hm^{-2}，全作基肥；单作玉米，纯氮 450 kg·hm^{-2}，按基肥：大喇叭口期追肥：灌浆期追肥=3：6：1 分施，P_2O_5 225 kg·hm^{-2}全作基肥；间作小麦带施纯氮 225 kg·hm^{-2}，

表 1 处理代码及其操作规范
Table 1 Treatment codes and operation specification

种植模式 Cropping pattern	茬口处理方式 Covering pattern	耕作方式 Tillage pattern	处理代码 Treatment code
单作小麦 Monoculture wheat	前茬小麦立茬收割 Wheat straw standing	免耕 No-tillage	NTSSW
	前茬小麦高等量秸秆还田 Wheat straw mulching	免耕 No-tillage	NTSW
	传统收割 No-mulching	翻耕 Tillage	CTW
单作玉米 Monoculture maize	每年覆新膜 Plastic film mulching for one year	翻耕 Tillage	SM_1
	一膜覆两年 Plastic film mulching for two years	免耕 No-tillage	SM_2
小麦间作玉米 Wheat/maize intercropping	前茬小麦立茬收割/玉米一膜覆两年 Wheat straw standing and plastic film mulching for two years of maize	免耕 No-tillage	$NTSSI_2$
	前茬小麦高等量秸秆覆盖/玉米一膜覆两年 Wheat straw covering and plastic film mulching for two years of maize	免耕 No-tillage	$NTSI_2$
	传统收割/玉米一膜一年 No-covering and plastic film mulching for one year of maize	翻耕 Tillage	CTI_1

P_2O_5 150 kg·hm^{-2}，全作基肥；玉米带施纯氮 450 kg·hm^{-2}，基肥、追肥比例同单作玉米，P_2O_5 225 kg·hm^{-2}，全作基肥。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤呼吸速率(*R*s)

用土壤呼吸测定系统 LI-8100A (LI-COR, USA)及其自带 20 cm 直径呼吸室测定。测定时将呼吸室置于小区小麦、玉米行间，收集从土壤释放的 CO_2，每点测定 5 个值，测定时间为 180 s。日变化的测定时间为 8:00—20:00，每间隔 2 h 测定一次，一天内共测定 7 次；季节变化的测定根据作物生育期进行，全生育期内共测定 9 次，其数据为一天内的平均值。对玉米带测定前 12 h，将玉米地膜揭出呼吸室边缘大小的裸区，让膜内累积的 CO_2 排出，测定时视为玉米带土壤的呼吸值。间作呼吸速率为两种作物带呼吸速率的均值；早播作物收获后，将该作物裸地带呼吸速率与晚播作物的平均值视为整个小区的 CO_2 呼吸值(μmol·m^{-2}·s^{-1})。CO_2 累积排放量计算公式如下[16]：

$$\mathrm{CE}=\sum\left[\left(t_{i+1}-t_i\right)\frac{R_{si+1}+R_{si}}{2}\times 0.158\,4\times 24\right]\times 0.272\,7\times 10 \quad (1)$$

式中：*R*s 为 CO_2 排放速率，i+1 与 i 表示两次相邻的测量，t 表示播种后天数，0.158 4 为将碳排放数值单位μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1} 转换为 g(CO_2)·m^{-2}·h^{-1} 的系数，0.272 7 为(CO_2)·m^{-2}·h^{-1}转换为 g(C)·m^{-2}·h^{-1}的系数，10 与 24 为将碳排放数值单位由 g(C)·m^{-2}·h^{-1} 转换为 kg(C)·hm^{-2} 的系数。

1.3.2 植物样品的采集与测定

地上部干物质量每 20 d 取样一次，每小区小麦取 20 株，玉米取 10 株，105 ℃杀青 2 h，80 ℃烘干至衡重后测定。地下部生物量分别在小麦、玉米成熟期采用挖掘剖面法取样，其中间作剖面长、宽、深分别为 50 cm、80 cm、100 cm，单作小麦与玉米的剖面长、宽、深分别为 50 cm、40 cm、100 cm，取出土样装入孔径为 200 目的尼龙网中用清水浸泡数小时后冲洗，捡出根系后再用清水漂洗，烘干后称取干重。

1.3.3 农田生态系统碳平衡测算

用净生态系统生产力(NEP)来表示生态系统的碳平衡：NEP=NPP_C–*R*m[17]。其中，NPP 为净初级生产力，本研究中以作物地上部与根部的总固碳量作为 NPP[18]，即 NPP_C；*R*m 为土壤微生物异氧呼吸碳释放量，*R*m=*R*as×0.865，*R*as 为作物生长季土壤呼吸释放总碳量[19]。NEP 为正值时，表示该系统是大气 CO_2 的吸收"汇"，反之为排放"源"。据估算，作物利用光合作用合成 1 g 有机质需要吸收 C 0.45 g，由此可计算出初级生产力 NPP 固碳量(NPP_C)；根据已有研究，NPP_C/*R*as 表示生态系统土壤的固碳潜力，其值越大，表明固碳潜力越强。

1.4 数据统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 进行整理汇总，用 SPSS 17.0 软件进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 小麦、玉米单作与间作农田土壤 CO_2 排放通量的季节动态

2.1.1 覆盖及种植模式对土壤 CO_2 排放季节动态的影响

如图 1，立茬免耕(NTSSW)、传统耕作(CTW)单作小麦及单作与间作玉米全生育期土壤 CO_2 排放呈单峰型变化趋势，秸秆覆盖免耕(NTSW)及小麦立茬免耕与玉米一膜覆两年间作($NTSSI_2$)与小麦秸秆覆盖与玉米一膜覆两年间作($NTSI_2$)小麦带呈双峰型变化。小麦在开花期的 CO_2 排放通量最高，NTSSW 与 NTSW 的碳排放通量显著低于 CTW，分

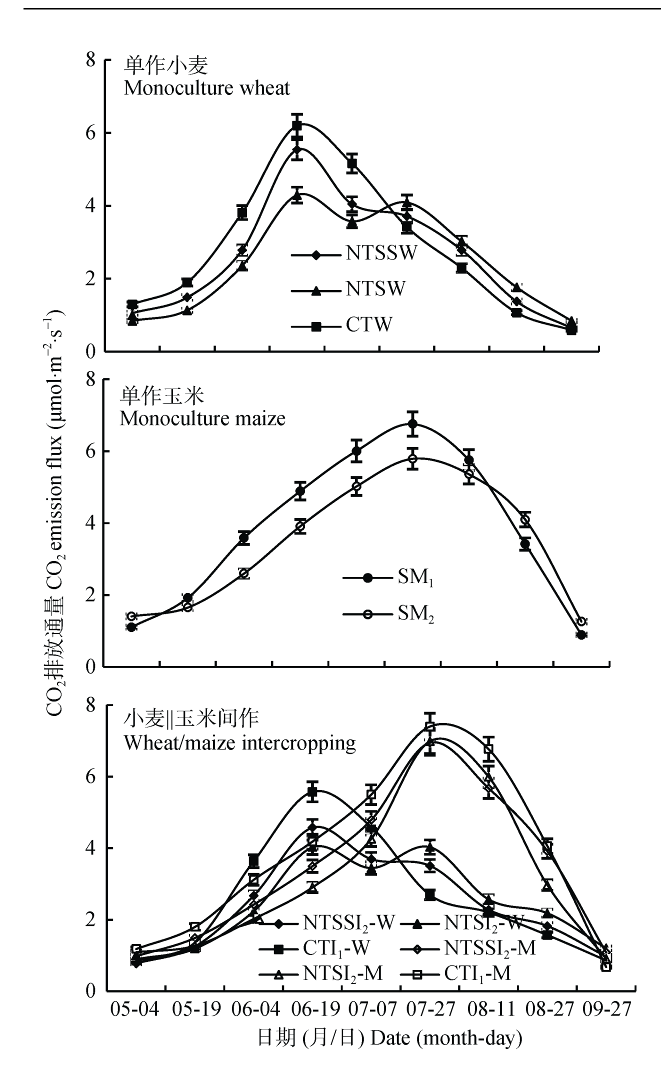


图 1　不同处理小麦、玉米单作及间作全生育期内土壤 CO_2 排放通量的季节变化

Fig. 1　Seasonal variations of soil CO_2 emission flux of wheat and maize in monoculture and intercropping systems under different treatments during whole growth period

"小麦||玉米间作"图中, W 为小麦带, M 为玉米带。下同。In figure of wheat/maize intercropping, "W" mean wheat strip, "M" means maize strip. The same below.

别低 10.6%、30.7%; $NTSSI_2$ 与 $NTSI_2$ 中小麦带碳排放通量显著低于传统耕作(CTI_1), 分别低 17.9%、27.8%。单作与间作玉米在玉米吐丝期的 CO_2 排放通量最高, 地膜两年用单作玉米排放通量较每年覆新膜低 14.3%; $NTSSI_2$ 与 $NTSI_2$ 玉米带中的排放通量比 CTI_1 分别低 6.1%、5.6%, 达到显著水平。说明小麦秸秆还田与玉米带一膜两年用栽培措施具有降低农田土壤 CO_2 最大排放通量的作用。

以小麦带、玉米带排放通量的平均值作为间作排放通量进行比较发现, $NTSSI_2$ 与 $NTSI_2$ 全生育期的平均排放通量分别较 CTI_1 降低 9.8%、13.6%; 与相应单作全生育期排放通量的平均值相比, $NTSSI_2$、$NTSI_2$、CTI_1 分别低 12.8%、16.5%、3.3%。说明小麦秸秆免耕还田与玉米地膜两年用栽培措施集成到间作具有降低农田土壤 CO_2 排放通量的作用, 且 $NTSI_2$ 处理的减排潜力最为突出。

2.1.2　不同处理高排放强度的持续天数

将 CO_2 日排放通量高于 5 μmol·m^{-2}·s^{-1} 定义为高排放日, 排放量在 3~5 μmol·m^{-2}·s^{-1} 定义为中等排放日。研究发现, CTW 高排放天数为 27 d, 分别较 NTSSW、NTSW 多 18 d、27 d, 但 CTW 中等排放天数较 NTSSW、NTSW 少 15 d、24 d; 间作中, 与 $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 小麦带排放通量相比, CTI_1 高排放天数(15 d)分别多 15 d、15 d, 中等排放天数(39 d)分别少 17 d、18 d; $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 和 CTI_1 处理小麦带高排放的天数分别较 CTW 少 27 d、27 d 和 12 d, 说明间作及免耕秸秆覆盖可减少小麦生育期内农田高强度 CO_2 排放通量的持续天数。传统耕作单作玉米(SM_1)高排放天数为 60 d, 较免耕一膜两年单作玉米(SM_2)多 17 d; SM_1 中等排放天数 45 d, 较 SM_2 多 7 d, 即免耕一膜两年用可降低高排放持续天数。CTI_1 比 $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 中玉米带高排放天数(52 d)分别多 13 d 和 17 d, CTI_1 较 $NTSS_I$ 中等排放天数(33 d)少 14 d、较 $NTSI_2$ 多 1 d。与 SM_1 相比, $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 和 CTI_1 玉米带高排放天数分别少 20 d、25 d 和 7 d, 说明间作及地膜两年用栽培措施可减少玉米带农田高强度 CO_2 排放通量的持续天数。不同间作模式间相比, $NTSSI_2$ 和 $NTSI_2$ 处理 CO_2 高排放天数分别比 CTI_1 少 15 d 和 20 d, 中等排放天数, $NTSSI_2$ 比 CTI_1 多 11 d、$NTSI_2$ 少 2 d, 即小麦秸秆覆盖、免耕和一膜两年用具有降低间作 CO_2 排放的优势。

2.2　小麦、玉米单作与间作农田土壤 CO_2 排放通量的日变化特征

2.2.1　覆盖方式对农田土壤 CO_2 排放通量日变化的影响

作物全生育期内不同处理农田土壤 CO_2 排放通量在测定时间 8:00—20:00 内总体呈低–高–低的单峰型变化趋势(图 2)。单作小麦土壤 CO_2 排放通量平均在 12:00 达到最高, 以传统耕作农田土壤 CO_2 排放通量最大, 为 4.60 μmol·m^{-2}·s^{-1}。单作玉米及间作小麦、玉米中, 土壤 CO_2 排放通量均在 14:00 达到最高, 且均为传统耕作 CO_2 排放通量最大, 分别为 5.19 μmol·m^{-2}·s^{-1}、3.57 μmol·m^{-2}·s^{-1} 和 3.85 μmol·m^{-2}·s^{-1}。

2.2.2　不同处理一天内不同排放通量的持续时间

作物全生育期内, NTSSW、NTSW 一天内土壤 CO_2 排放通量高于 4 μmol·m^{-2}·s^{-1} 的持续时间比 CTW 均多 5 h; 在 3~4 μmol·m^{-2}·s^{-1} 的持续时间分别比 CTW 少 1.9 h 和 3.6 h; CTI_1 比 $NTSSI_2$ 小麦带排放通

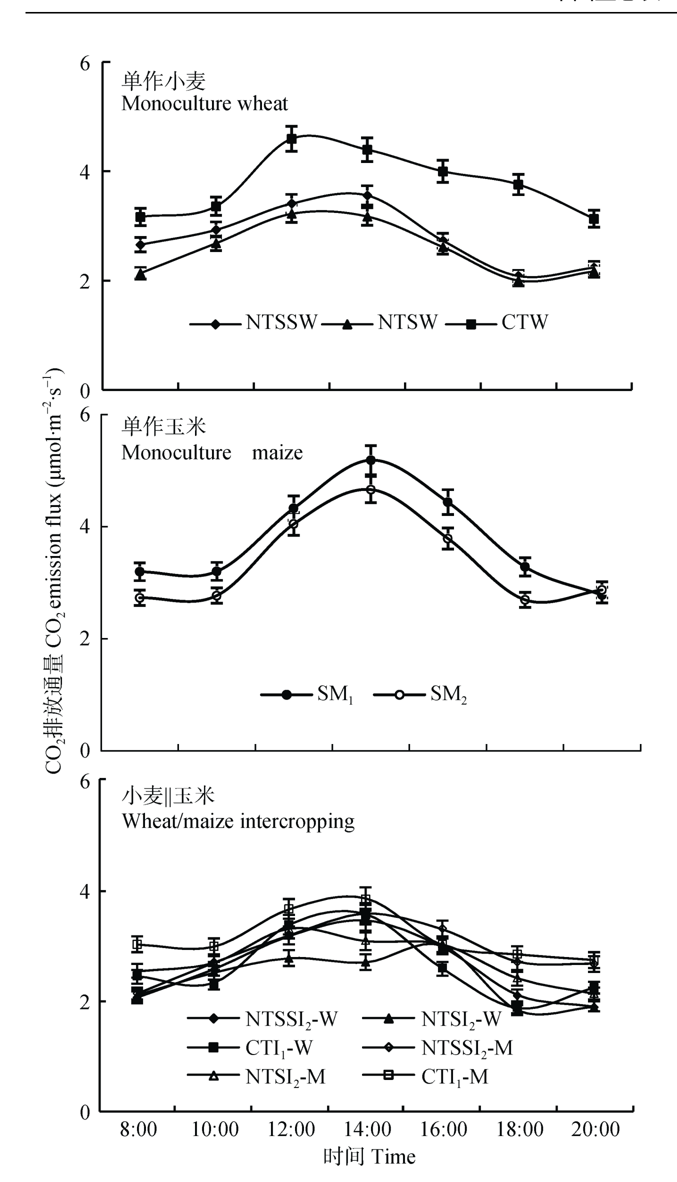


图 2 不同处理小麦、玉米单作及间作全生育期内土壤 CO_2 排放通量的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of soil CO_2 emission flux of wheat and maize in monoculture and intercropping systems under different treatments during whole growth period

量高于 3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间(1.9 h)少 0.6 h，而比 $NTSI_2$ 小麦带排放通量多 1.9 h; $NTSSI_2$、$NTSI_2$、CTI_1 小麦带高于 3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间比 CTW 分别少 9.5 h、12.0 h 和 10.1 h，说明间作及免耕秸秆覆盖措施可减少同一天小麦带土壤高强度 CO_2 排放通量的持续时间。SM_1 高于 4 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间(5.3 h)比 SM_2 多 1.8 h，在 3~4 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间(5.8 h)少 2.3 h，即一膜两年用可减少玉米农田土壤 CO_2 高排放通量的持续时间。CTI_1 中玉米带高于 3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间(8 h)比 $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 分别多 4.2 h、3 h，2~3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间(4 h)比 $NTSSI_2$、$NTSI_2$ 分别少 4.2 h、3 h；与 SM_1 相比，$NTSSI_2$、$NTSI_2$、CTI_1 玉米带高于 3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间分别少 5.4 h、6.1 h、4.1 h，说明间作及地膜两年用可减少同一天玉米带土壤高强度 CO_2 排放通量的持续时间。间作模式间相比，$NTSSI_2$ 和 $NTSI_2$ 高于 3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的持续时间分别比 CTI_1 少 0.6 h 和 1.5 h，即免耕秸秆覆盖与一膜两年用具有降低间作 CO_2 高排放的优势。

2.3 不同单作与间作处理农田土壤 CO_2 总排放量的差异

2.3.1 不同种植模式农田土壤 CO_2 的总排放量

间作可降低农田总 CO_2 排放量(图 3)。小麦收获前，间作中小麦带碳排放总量显著低于CTW，玉米带碳排放总量显著低于 SM_1，分别降低 10.8%~34.1%与 8.4%~33.7%，间作群体较传统单作处理平均减排 288~1 020 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 9.6%~34.0%。小麦收获后，与 CTW 相比，$NTSI_2$ 中小麦带升高 13.5%，CTI_1 中小麦带降低 16.0%，均达到显著性水平；$NTSSI_2$ 和 CTI_1 的总排放量较传统单作处理平均分别降低 73 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 70 $kg \cdot hm^{-2}$，降低比例为 2.9%和 2.8%，但 $NTSI_2$ 提高 143 $kg \cdot hm^{-2}$，提高比例为 5.8%。全生育期内，间作总排放量较传统单作平均减排 279~876 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 5.1%~16.0%，差异显著。

2.3.2 覆盖方式对农田土壤 CO_2 总排放量的影响

比较同种种植模式不同覆盖方式农田土壤 CO_2 总排放量发现，小麦收获前，与 CTW 处理相比，单作小麦 NTSSW、NTSW 处理土壤 CO_2 总排放量分别降低 648 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 966 $kg \cdot hm^{-2}$，降低比例为 21.3%和 31.8%，达显著水平(图 3)；间作模式中，$NTSSI_2$、$NTSI_2$ 比 CTI_1 中小麦带分别减排 481 $kg \cdot hm^{-2}$、711 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 17.7%、26.2%，玉米带分别减排 454 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 752 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 16.7%和 27.7%，间作群体分别减排 468 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 731 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 17.2%和 26.9%，均达到显著水平。小麦收获后，单作与间作小麦中秸秆覆盖处理高于传统耕作，玉米带中差异不显著。全生育期内，SM_2 较 SM_1 减排 632 $kg \cdot hm^{-2}$，降幅为 10.0%; $NTSSI_2$ 和 $NTSI_2$ 比 CTI_1 分别减排 471 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 518 $kg \cdot hm^{-2}$，减幅为 9.2%和 10.1%，均达到显著性差异。说明作物生育期内，小麦秸秆免耕覆盖、一膜覆两年栽培措施，及二者的集成模式均具有降低农田土壤 CO_2 总排放量的优势，其中以 $NTSI_2$ 的碳减排潜力最大。

2.4 不同处理作物生长期内的农田碳收支特征

免耕秸秆覆盖及一膜两年用耕作措施下，各处理的 NEP 值均为正值，农田生态系统能够固定大气中的 CO_2，表现为吸收“汇”(表 2)。不同种植模式下

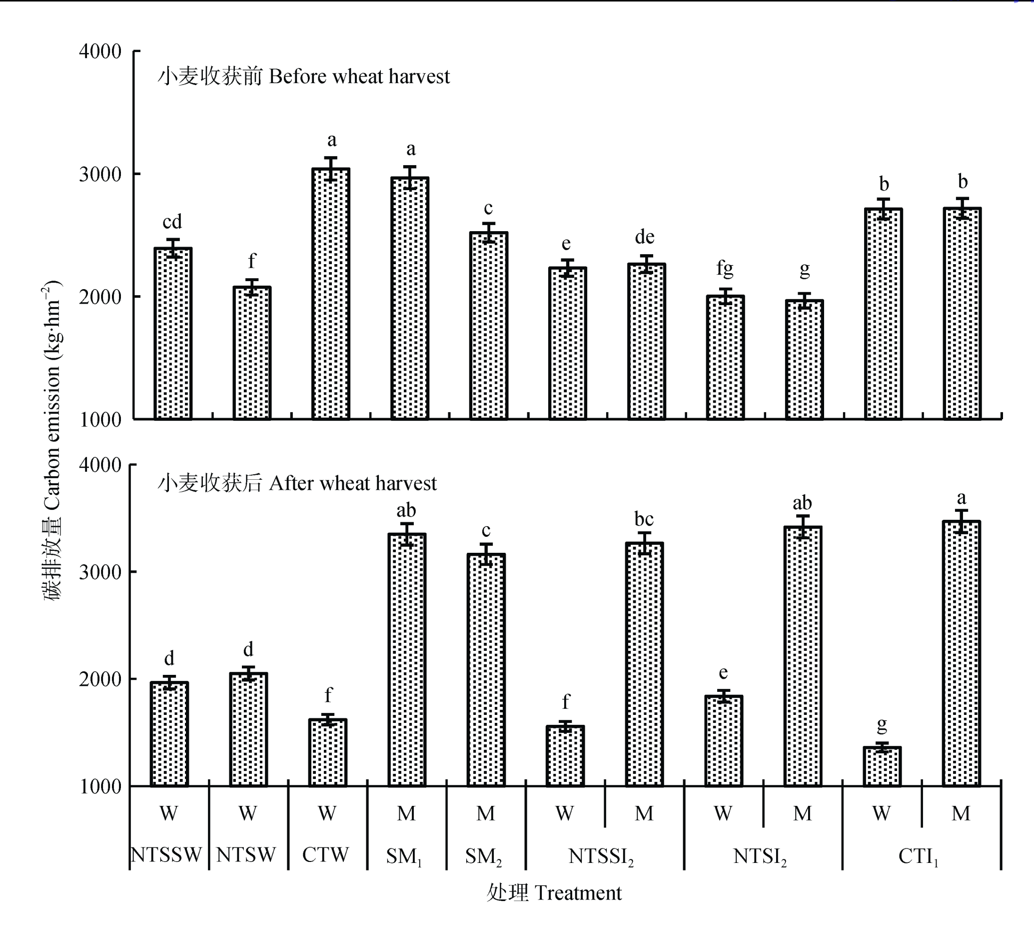


图 3　不同处理单作和间作小麦、玉米生长期内土壤碳排放总量

Fig. 3　Total soil carbon emission of wheat and maize in monoculture and intercropping systems under different treatments

不同字母处理间表示 0.05 水平差异显著。Different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 probability level.

表 2　不同处理单作和间作小麦、玉米生长期内的农田碳收支特征

Table 2　Farmland carbon budget during the crop growth period of monoculture and intercropping systems of wheat and maize under different treatments

处理 Treatment	地上部生物量 Shoot biomass (kg·hm^{-2})	根生物量 Root biomass (kg·hm^{-2})	净初级生产力 NPP (kg·hm^{-2})	净初级生产力固碳量(NPP_C) C fixation of NPP [kg(C)·hm^{-2})]	CO_2排放总量 Total CO_2 emission (kg·hm^{-2})	碳排放总量 Total C emission [kg(C)·hm^{-2}]	土壤微生物异氧呼吸碳释放量(*Rm*) C emission from soil microbial respiration [kg(C)·hm^{-2}]	净生态系统生产力(NEP) Net ecological productivity [kg(C)·hm^{-2}]	NPP_C/*Ras*[1)]
NTSSW	17 387±69e	759±8g	18 146±129cd	8 166±53cd	4 357±21e	1 188±14de	1 028±13de	7 138±62c	6.9±0.09e
NTSW	17 915±107d	1 014±13f	18 929±146c	8 518±55c	4 124±18f	1 125±11e	973±10e	7 545±67c	7.6±0.14d
CTW	16 398±55f	949±10f	17 346±125d	7 806±58d	4 660±31d	1 271±14d	1 099±6d	6 707±371d	6.1±0.10f
SM_1	36 771±25b	2 105±15a	38 876±37a	17 494±24a	6 315±39a	1 722±16a	1 490±2a	16 004±53a	10.2±0.11c
SM_2	35 501±93c	1 988±14b	37 488±200ab	16 870±64ab	5 683±29b	1 550±10b	1 341±11b	15 529±70ab	10.9±0.10bc
$NTSSI_2$	36 938±31ab	1 589±16c	38 528±15a	17 337±24a	4 628±10d	1 262±12d	1 092±6d	16 245±39a	13.7±0.11a
$NTSI_2$	37 206±40a	1 422±12d	38 628±36a	17 383±9a	4 543±28de	1 239±9d	1 072±5d	16 311±50a	14.0±0.07a
CTI_1	35 198±122c	1 335±9e	36 533±138b	16 440±54b	5 237±43c	1 428±13c	1 235±16c	15 205±64b	11.5±0.13b

不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。1)*Ras*：作物生长季土壤呼吸释放总碳量。Different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 probability level. 1)*Ras*: total C emission of soil respiration during crop growing period.

NEP值总体表现为：间作>单作玉米>单作小麦，$NTSSI_2$、$NTSI_2$和CTI_1的NEP值较传统单作处理平均分别高43.1%、43.6%和33.9%，达到显著差异。说明集成免耕秸秆覆盖与地膜两年用栽培措施表现出较强的碳汇潜力。间作模式中，$NTSI_2$的NPP_C/*Ras*值最高，较CTI_1高21.7%，表明其固碳潜力最强，因此，免耕秸秆覆盖结合一膜两年用具有增强农田土壤碳汇的作用，为试区内可采取的适宜耕作措施。

3　讨论

3.1　土壤碳排放对不同种植模式的响应

间套作由于不同作物在形态、生态型和生育期

上的错位搭配形成了在时间、空间和生育期上的生态位互补[5,6]，可增加土壤有机碳含量，较单作模式可降低农田碳排放，如Chai等[7]研究表明，小麦||玉米间作系统的农田碳排放较单作玉米显著降低24%。本研究中证实了相关结论，间作较单作玉米农田碳排放降低20%。另外，小麦||玉米间作模式中，玉米作为一种高效生产的C_4作物，在单作模式下生育期内碳排放总量要显著高于小麦[8,20]，若将玉米与小麦组配在间作中，即C_4与C_3作物组合，由于间作复合群体种间相互作用，玉米生长受到部分抑制，其生长带内土壤呼吸速率明显降低，间作小麦、玉米较相应单作减排效应明显，这与Qin等[20]研究一致。间作玉米较单作玉米能够显著降低农田碳排放，由于间作模式作为一种提高作物生产效率与减少农田碳排放的广泛栽培模式，因此，更加系统地研究间作种植模式的农田碳排放机制对于农田碳减排至关重要。

3.2 耕作措施及覆盖方式与土壤碳排放的相关性

由于农田土壤是陆地碳循环中最大的碳库，土壤呼吸是农田碳库向大气碳库输入的主要途径，土壤呼吸速率的变化对全球气候变暖存在较大影响[21]。因此，深入研究土壤耕作措施和覆盖方式对土壤呼吸排放特征的影响，对制定科学有效的土壤耕作方式及土壤碳调控管理措施具有重要意义。研究表明，耕作方式和秸秆覆盖对农田土壤呼吸存在显著影响[8]。相比保护性耕作，传统耕作由于对土壤的扰动频繁，增强了土壤通气，土壤微生物较为活跃，其农田土壤呼吸速率显著高于旋耕和免耕[22]，而深松耕的土壤呼吸速率又显著高于翻耕处理[23]。秸秆翻埋还田可以提高土壤呼吸速率[24]，且随着秸秆还田量的增加，土壤碳排放通量显著增加[25]；而秸秆覆盖则降低了土壤呼吸速率[8]。另有研究表明，尽管小麦间作玉米模式可降低农田碳排放，但玉米带碳排放仍然显著高于与之相邻的小麦带[8]，因为玉米带地膜覆盖能显著增加土壤 CO_2释放[15]，采用保护性耕作是实现碳排减少的可行途径，因此，本研究将免耕地膜两年用耕作措施应用于单作玉米与小麦间作玉米模式中，研究了不同秸秆和一膜两年用覆盖方式对单作、间作农田土壤碳排放的影响，表明免耕秸秆覆盖与一膜两年用覆盖方式明显降低了单作农田 CO_2 减排总量，将两者集成应用于间作模式减排效应更突出。本研究中间作采用带状不同覆盖措施，有效协调了不同带内对保护性耕作的应用，使间作与保护性耕作得到有机结合，对协调系统减排降耗具有明显效果，值得研究者关注。

3.3 秸秆覆盖、地膜两年用与间作对土壤碳排放的综合效应

已有研究表明，集成应用免耕和秸秆还田措施对协调小麦玉米间作系统提高产量、降低碳排具有重要作用，不仅是促增产的有效保障更是减碳排的有力措施[8]。其中，小麦秸秆免耕覆盖集成在间作模式中对碳减排作用最大，已成为该区小麦||玉米间作系统中集成应用保护性耕作技术的主要措施，以保证作物增产的同时减少碳排，降低农业生产对环境造成的负面影响[8]。前人研究表明，土壤温度直接影响微生物和植物呼吸酶的活性，从而影响土壤的呼吸速率[26]，免耕秸秆覆盖技术通过有效改善土壤结构，降低土壤温度，进而降低了土壤 CO_2 排放通量[27]。本研究将免耕小麦秸秆覆盖、一膜两年用两种不同耕作措施集成在间作模式，必然会引起不同条带土壤温度及不同作物生长发育的差异[28]，其适应特性也随所在环境的变化而变化[29−30]，必然会引起土壤呼吸差异，其主要表现在碳排放通量的季节与日变化差异。本研究表明，集秸秆覆盖与地膜两年用于一体间作较传统间作模式明显降低了农田碳排放总量，主要因为集成模式减少作物生育期内高强度 CO_2 排放通量的持续天数及同一天内的持续时间。$NTSS_I$ 由于秸秆立茬，不能在地表或表土层直接形成秸秆物理隔层，对土壤温度降低作用不明显，因而对抑制土壤呼吸、减少土壤碳排的效果稍弱于 NTS_I，即 NTS_I 处理的减排效应最为突出。

已有学者从碳固定与排放的角度研究得出轮作模式农田生态系统表现为CO_2吸收“汇”[31]，但有关间作模式农田碳平衡问题鲜见报道。本研究免耕秸秆覆盖与一膜两年用间作农田生态系统是大气CO_2的吸收“汇”，表现出较强的固碳潜力，因为秸秆覆盖增加了秸秆的投入量，从而实现农田固碳增“汇”的目的。

免耕秸秆覆盖与一膜两年用应用于小麦间作玉米中碳减排效应显著，推荐集成应用秸秆覆盖和地膜两年用作为该区间作的主导模式，从而稳固系统碳减排与高产的协同促进。另外，间作采用小麦带秸秆覆盖及玉米带地膜两年用，使间作与保护性耕作得以结合，有效协调了不同带内对保护性耕作的应用，因此，集免耕秸秆覆盖与地膜两年用于一体的小麦间作玉米可作为一种高产、高效的减排模式进一步深入研究。

4 结论

小麦间作玉米可降低农田土壤 CO_2 总排放量，比传统单作的平均减排 279~829 kg·hm^{-2}，减幅为 5.1%~16.0%，以集成免耕秸秆覆盖及一膜两年用耕作措施的间作模式减排效应更明显，比传统间作分别降低 9.2%(NTSSI$_2$)和 10.1%(NTSI$_2$)，减排量分别为 471 kg·hm^{-2} 与 518 kg·hm^{-2}。小麦秸秆覆盖、免耕和一膜两年用集成到间作模式中减少 CO_2 排放量的主要原因是，减少了高 CO_2 排放通量的持续天数及一天内高排放强度的持续时间。免耕小麦秸秆覆盖与地膜两年用栽培措施均表现出“碳汇”特征，以两者集成于间作模式中减排潜力、碳汇作用更为突出，与传统间作相比，其 NPP$_C$/*R*as 分别高 19.1%(NTSSI$_2$)与 21.7%(NTSI$_2$)。因此，免耕秸秆覆盖与一膜两年用集成到间作中可作为干旱绿洲灌区碳减排、碳增汇的高效农作制模式。

参考文献 References

[1] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298(5601): 2173–2176

[2] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. Nature, 1990, 346(6286): 713–719

[3] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2488–2493
Zhai S, Gao B Y, Wang J Y, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2488–2493

[4] Firbank L G, Watkinson A R. On the effects of competition: From monocultures to mixtures[M]//Grace J B, Tilman D. Perspectives on Plant Competition. San Diego: Academic Press, 1990: 165–192

[5] Takim F O. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. Journal of Agriculture and Biodiversity Research, 2012, 1(4): 53–59

[6] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4505–4514
Su B Y, Chen S B, Li Y G, et al. Intercropping enhances the farmland ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4505–4514

[7] Chai Q, Qin A Z, Gan Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(2): 535–543

[8] Hu F L, Chai Q, Yu A Z, et al. Less carbon emissions of wheat–maize intercropping under reduced tillage in arid areas[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 701–711

[9] Fan Z L, Chai Q, Huang G B, et al. Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an oasis region[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 52–58

[10] 薛建福, 赵鑫, Dikgwatlhe S B, 等. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6006–6013
Xue J F, Zhao X, Dikgwatlhe S B, et al. Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6006–6013

[11] Boeckx P, Van Nieuland K, Van Cleemput O. Short-term effect of tillage intensity on N_2O and CO_2 emissions[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(3): 453–461

[12] Fuentes M, Hidalgo C, Etchevers J, et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO_2 emissions[J]. Plant and Soil, 2012, 355(1/2): 183–197

[13] Li F M, Wang J, Xu J Z. Plastic film mulch effect on spring wheat in a semiarid region[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2005, 25(4): 5–17

[14] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41–47

[15] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. Environment International, 2004, 30(7): 981–990

[16] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N_2O and CO_2 emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(11): 1748–1757

[17] Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 536–546

[18] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156–160
Huang B, Wang J G, Gong Y S, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 156–160

[19] Kuzyakov Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: A comparison of four methods[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1621–1631

[20] Qin A Z, Huang G B, Chai Q, et al. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 1–10

[21] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627

[22] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719–733
Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719–733

[23] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012,

28(18): 192–199
Zhang J L, Tanveer S K, Wen X X, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 192–199
[24] 李玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆还田方式和氮肥类型对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 842–849
Li W, Zhang J B, Zhang C Z. Effects of straw incorporation and N fertilization on soil respiration during maize (*Zea mays* L.) growth in Huanghuaihai Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 842–849
[25] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883–2887
Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2883–2887
[26] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 玉米秸秆还田对土壤呼吸速率的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 105–108
Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, et al. Effects of maize straw with returning into field on rate of soil respiration[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 105–108
[27] Arshad M A. Tillage and soil quality: Tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroecosystems[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 53(1): 1–2
[28] Monneveux P, Quillérou E, Sanchez C, et al. Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment (Mexico)[J]. Plant and Soil, 2006, 279(1/2): 95–105
[29] Cahill Jr J F. Fertilization effects on interactions between above- and belowground competition in an old field[J]. Ecology, 1999, 80(2): 466–480
[30] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 249–256
[31] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦–玉米–大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 395–401
Liang R, Han X Z, Qiao Y F, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat-maize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 395–401